

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2020.03.023

苏北盆地 ZJ 探区页岩油藏勘探评价实践与认识

黄小青,王建君,韩永胜

(中国石油浙江油田公司勘探开发研究院,浙江 杭州 3100230)

摘 要:苏北盆地常规油气资源较为匮乏,非常规领域勘探程度低,综合地震、岩电、试油等资料,利用物化分析、井震多维解释等手段,从烃源岩和储层特征入手,认识到 ZJ 探区阜宁组二亚段和泰州组二亚段广泛发育 2 套源储一体式的页岩油藏,油藏整装且资源量丰富;探索形成了一套地质工程一体化评价技术体系,从源岩品质、储层品质和工程品质综合评价页岩油藏特征,创新利用“岩、电、震”手段综合识别辉绿岩,精准刻画其空间展布特征,划分 3 种油藏类型,全过程指导钻井压裂试油,并通过老井复查,实现了页岩油藏纵横向上的全方位突破,4 口井/7 层获高产油流,初步圈定有利面积 70 km²,资源量超亿 t,对浙江油田乃至整个大南方非常规资源勘探具有重大意义。

关键词:页岩油藏;烃源岩;阜二段;泰二段;苏北盆

中图分类号:P618.13

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2020)03-0252-12

The Practice and Understanding of the Shale Oil Reservoir in ZJ Exploration Area of Subei Basin

HUANG Xiaoqing, WANG Jianjun, HAN Yongsheng

(Zhejiang Oilfield Exploration and Development Research Institute, CNPC, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

Abstract: Subei basin is short of Conventional oil and gas resources, whereas in terms of unconventional resources, the exploration is still in a low level. Based on the data of seismic, rock-electro and well testing, this article, using the means of physical chemical analysis and well seismic multidimensional interpretation, found out that there are abundant and monolithic shale oil resources in source rock in the 2nd member of Funing Formation and the 2nd member of Taizhou Formation in North Jiangsu exploration area. an evaluation system of geology-engineering integration was formed to comprehensively evaluate the quality of the source rock, the reservoir and the engineering using the “rock-electro-seismic” method to recognize diabase and its spatial distribution. Three types of reservoirs are classified. 4 wells /7 layers achieve high oil flow. The favorable area is about 70 km² and the amount of resources is over billion tons. It is of great significance for the exploration of unconventional resources in Zhejiang oil field and the whole southern area of China.

Keywords: the shale oil reservoir; source rock; 2nd member of Funing formation; 2nd member of Taizhou formation; Subei basin

收稿日期:2019-12-31;修回日期:2020-04-24

基金项目:中石油股份公司科学研究与技术开发重大专项“苏北油区新类型油藏勘探方向与预探目标选择”(kt2017-08-02-1)资助

作者简介:黄小青(1988-),男,安徽安庆人,硕士,工程师,从事地质工程研究工作。E-mail:huangxq85@petrochina.com.cn

苏北盆地 ZJ 探区 2016 年以前勘探开发重点集中在新生界古近系,以阜宁组三段、戴南组和三垛组特低渗-中渗砂岩油藏为主,油藏小而散(平均油藏面积为 1.1 km²),埋藏深(平均为 2 500~3 000 m),油品差(凝点为 40℃左右),资源有限。近几年勘探评价工作停滞不前,高凝油开发成本居高不下,亟需寻找优质替代资源。2016 年以来,随着逐步深入地页岩油藏的研究,在探区内阜宁组二段和泰州组二段泥页岩中发现自生自储的页岩油藏,油层厚度大、面积广,相对整装,试油获高产工业油流,其对于苏北盆地 ZJ 探区的效益开发具有重大的现实意义。

1 研究区地质概况

研究工区位于江苏省南通市海安县和盐城大丰市境内,构造上处于苏北盆地东台坳陷。主力探区分别为海安凹陷的曲塘次凹和白驹凹陷的洋心次凹

内。海安凹陷位于苏北盆地东台坳陷的东南部,总体表现为“七次凹夹一隆”的构造格局;曲塘次凹为受北东走向的生长断层——曲塘断裂的控制,形成断距达 2 600 m 的箕状凹陷。白驹凹陷位于苏北盆地东台坳陷的北部,洋心次凹是一个北东东走向的箕状凹陷。2 个凹陷中心构造起伏不大,相对平稳,地层发育稳定(陈安定等,2010)(图 1)。

苏北盆地经历 3 期大规模海侵,形成 3 套厚层泥岩沉积,其中泰二段地层形成于古新世晚期,范围相对较小,白驹凹陷最发育,发育生物灰岩、鲕状灰岩、有形虫、轮藻等化石;阜二段地层形成于始新世早期,海安凹陷发育,有生物灰岩、鲕状灰岩、泥灰岩。这 2 套地层均为海相沉积,具有沉积规模大、物源丰富、岩性脆而巨厚的特征(傅强等,2007),为本次研究的 2 套源储一体目的层。据最新的研究成果,按沉积特征将阜二段划分为 4 个亚段,泰二段共划分 3 个亚段,岩性以灰黑色泥岩、黑灰色泥质白云岩为主。

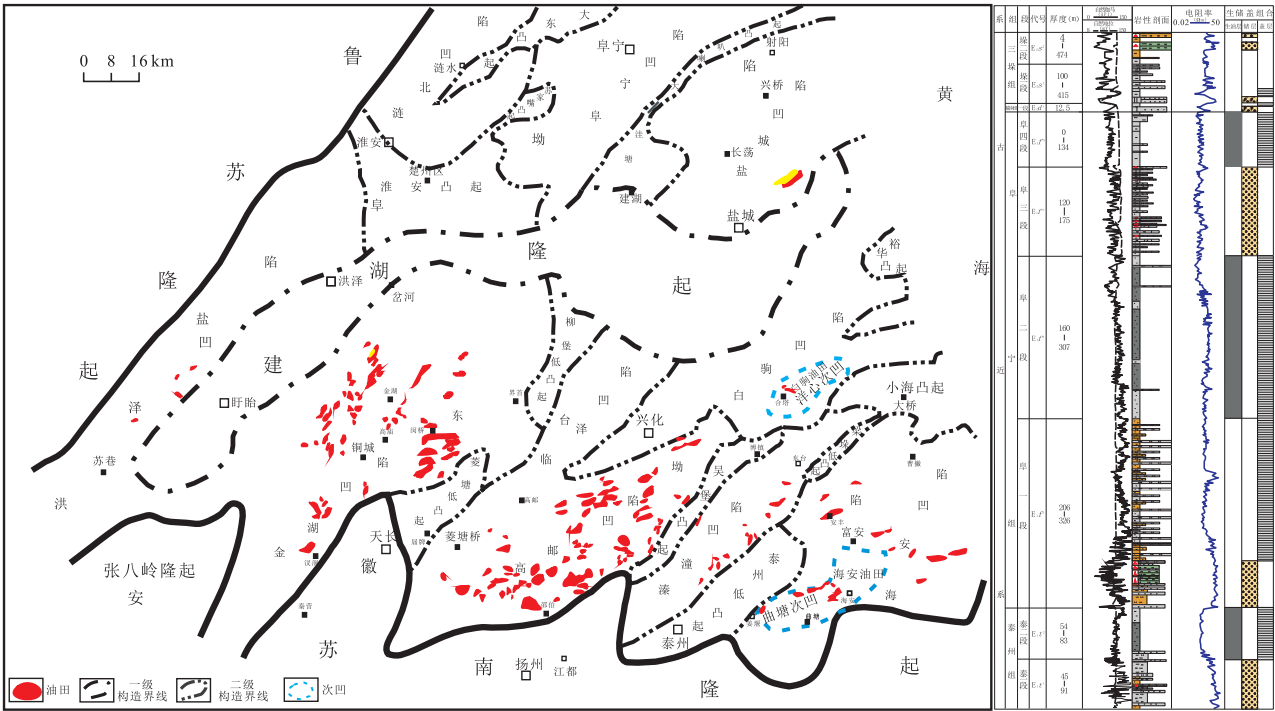


图 1 苏北区域构造及地层图剖面(邱旭明等,2016;罗怀忠等,2011)

Fig. 1 Tectonic location and lithology map of Subei basin(QIU Xuming, et al. ,2016;LUO Huaizhong, et al. 2011)

2 页岩油藏特征

探区内阜二段、泰二段岩性以暗色泥页岩为主,

有机质丰度高,是一套优质生油岩。除了为高部位的常规砂岩油藏供源外,自身大量发育的有机质孔和裂缝又可作为良好储集空间,形成一套自生自储的页岩油藏(管保山等,2019;魏建设等,2018;贾培

锋等,2015)。

2.1 烃源岩特征

2.1.1 空间分布特征

根据单井的测井、录井资料,对研究区内单井烃源岩发育状况进行了系统分析,形成阜二段和泰二段烃源岩厚度平面分布图(图 2)。曲塘、洋心次凹烃源岩厚度大于 150 m 的面积分别达到了 280 km² 和 81 km²,证实探区内暗色泥页岩厚度较大。随着不同区域沉积水体深度的变化,曲塘次凹 H-10~H-10 井区和洋心次凹东北部为沉积中心,泥岩厚

度最厚,中心厚度为 150~240 m 以上,成为凹陷内的生烃中心。

2.1.2 有机质丰度特征

近年来,随着研究工作的不断深入,认为烃源岩的有机质丰度和类型是烃源岩评价的主要指标。有机质丰度高、类型好的烃源岩更有利于油气生成、迁移和富集(张水昌等,2002;倪春华等,2009)。

目前,公认的评价有机质丰度的指标有:有机碳含量、生烃潜量、氯仿沥青“A”、总烃,评价标准见表 1(黄第藩等,1992)。

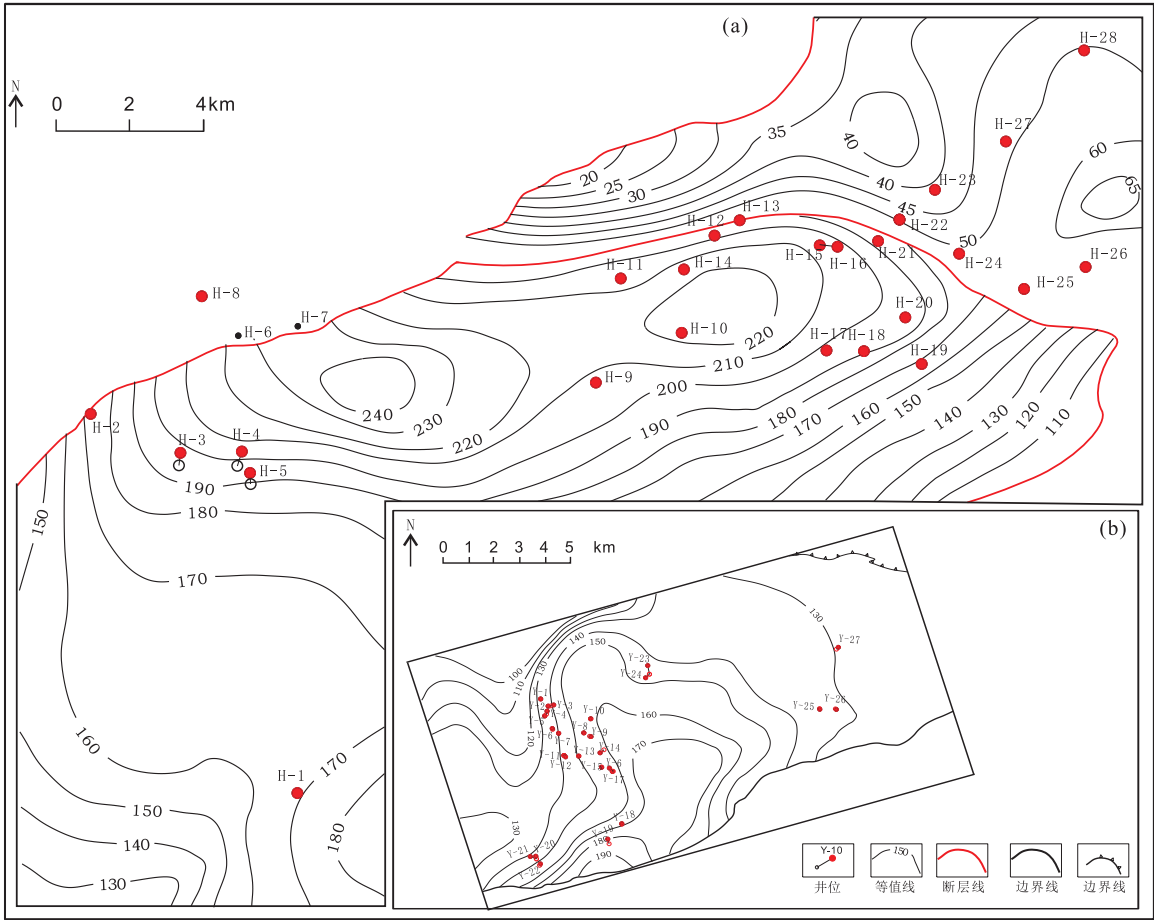


图 2 (a)曲塘和(b)洋心次凹烃源岩厚度分布图

Fig. 2 (a)The thickness of hydrocarbon source rock distribution in Qutang and (b)Yangxin secondary sag

表 1 中国陆相烃源岩有机质丰度评价标准

Tab. 1 The evaluation standard of organic matter abundance of terrestrial source rocks in China

源岩级别	有机碳 TOC(%)	氯仿沥青“A”(%)	总烃 HC(%)	生烃潜量 S1+S2(×10 ⁻³)
好	>1.0	>0.1	>50	>6.0
较好	1.0~0.6	0.05~0.1	20~50	2.0~6.0
较差	0.6~0.4	0.01~0.05	10~20	0.5~2
非烃	<0.4	<0.01	<10	<0.5

通过单井的实测分析数据表明(图 3),阜二段和泰二段有机质丰度整体较高,但各段表现有所差异。阜二段优质烃源岩主要分布在 E_1f^2 III 亚段和 E_1f^2 II 亚段,TOC 平均值为 $1.53\%\sim 2.52\%$, S_1+S_2 平均值为 7.6×10^{-3} ,氯仿沥青“A”平均值为 3.14% ,范围变化在 $0.04\%\sim 0.126\%$; E_1f^2 I 亚段烃源岩有机质丰度较差,TOC 分布在 1% 以下的样品占 86% 以上,接近一半的烃源岩为无效烃源岩。按烃源岩评价标准, E_1f^2 III 亚段和 E_1f^2 II 亚段主要为好-优质烃源岩发育层段,而 E_1f^2 I 亚段主要为差-中等烃源岩。

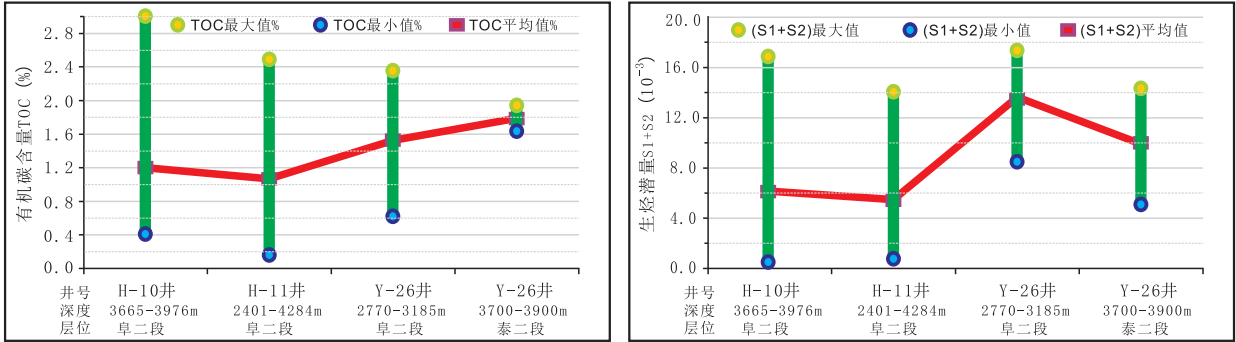


图 3 阜二段、泰二段烃源岩 TOC 和 S1+S2 指标统计图

Fig. 3 The index chart of TOC and S1+S2 in 2nd member of Funing and Taizou formation

2.1.3 有机质类型和热演化特征

有机质类型是衡量有机质质量的指标,在不同沉积地层中,由于沉积环境、生物种群等差异,使源岩中保存的有机质质量有较大的差异(曾花森等, 2013;涂建琪等,1998;李春鹏等,2017)。曲塘次凹和洋心次凹烃源岩为封闭的湖相沉积,烃源岩主要为腐泥型,有机质类型以 I 型和 III 型为主,部分发育偏腐殖型的 II 2 型和 III 型有机质,母质以陆源高等植物为主,次为陆源低等生物。在湖盆的发育过程中有机质的输入、沉积环境不尽相同,有机质的类型也有所差异。

阜二段有机质类型总体表现为混合型,但纵向上差异较大, E_1f^2 IV 亚段和 E_1f^2 II 亚段有机质类型以 I 型和 II 1 型为主;其他层段以 II 2 型和 III 型为主。平面上,以 H-10 井为中心向凹陷边部,有从偏腐殖型有机质向混合型、偏腐殖型过渡的趋势。泰二段有机质类型总体表现为混合型 I 型和 II 型,其中 III 亚段有机质类型以 I 型和 II 1 型为主,其他

泰二段 E_1t^2 III 亚段发育有 $80\sim 100$ m 厚的黑色泥页岩和深灰色钙质泥页岩,有机碳平均值为 1.75% , S_1+S_2 平均值达到 9.0×10^{-3} ,一般都在 6×10^{-3} 以上。氯仿沥青“A”平均值为 0.086% ,总烃平均值为 429×10^{-6} 。 Et_2 I、 Et_2 II 亚段 TOC 平均值为 1.23% ,生烃潜量 S_1+S_2 平均值为 2.93×10^{-3} 。可溶有机质含量较低,14 个样品氯仿沥青“A”平均值仅为 0.038% ,总烃平均值仅为 182×10^{-6} ,最大达 485×10^{-6} 。总体评价该泰二段烃源岩, Et_2 III 亚段属于优质烃源岩。 E_1t^2 I、 E_1t^2 II 亚段达到中等烃源岩的标准。

层段以 II 2 型为主。

镜质体反射率 R_o 被认为是研究烃源岩成熟度和进行演化阶段划分的最佳指标之一。其主要优点有:① R_o 具有不可逆性,能够代表最高古地温。② R_o 随埋藏深度的增加而有规律性地呈半对数直线增加(李艳红等,2000;单俊峰等,2017)。根据曲塘阜二段单井 R_o 数据资料编制的热演化综合曲线表明,阜二段烃源岩生烃门限深度为 $2\ 000$ m,此时 R_o 约为 0.5% 。而埋深达到 $3\ 900$ m, R_o 达到 0.8% ,仍然处于大量生油阶段(图 4c)。综合反映出曲塘次凹烃源岩成熟门限深度较大、大量生油井段长、演化序列完整的特征。平面上, R_o 为 $0.5\%\sim 1.1\%$,平均值为 0.92% ,其中大于 0.7% 的占 74% ,总体处于低成熟-成熟阶段。

从泰二段烃源岩 R_o 数据的统计结果看, R_o 基本分布区间为 $0.6\%\sim 1.1\%$,处于大量生油阶段,平面上洋心次凹泰二段烃源岩均已进入成熟阶段(图 4a、图 4b)。

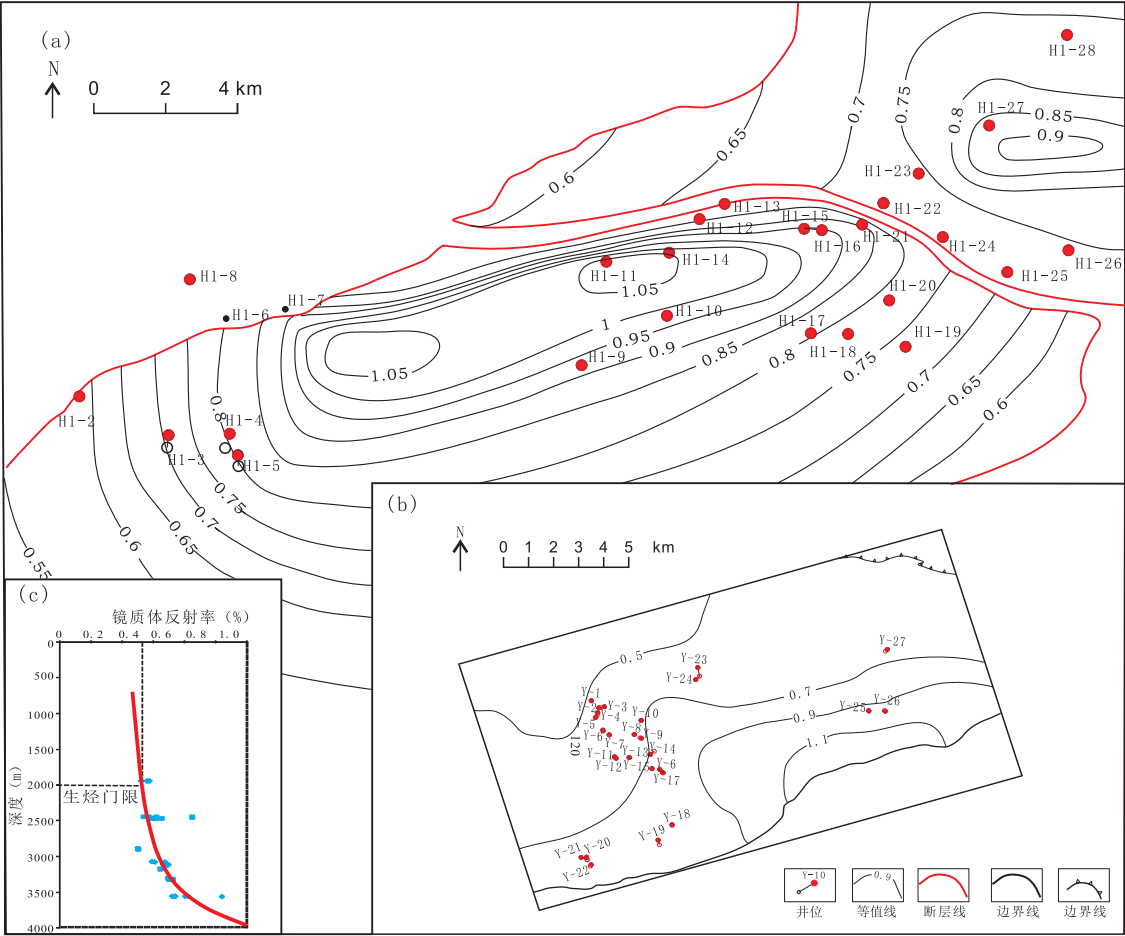


图 4 (a)曲塘、(b)洋心次凹 R_o 平面等值图及(c)阜二段 R_o 与埋深关系图

Fig. 4 (a)Plane contour map of R_o in Qutang, (b)Yangxin secondary sag and (c)relationship deeping with 2nd member of Funing formation

2.1.4 资源潜力特征

页岩油资源主要包括烃源岩滞留烃与储层滞留烃 2 类,利用成因法(盆地模拟技术)逐步剥离计算残留页岩油资源量,然后利用“小面元法”,通过求取不同面元的资源量值进行累加获得总资源量(李登华等, 2017; 郭秋麟等, 2017; 朱德顺, 2019)。初步计算 ZJ 探区页岩油地质资源量超亿 t,资源丰度最高的地方位于洋心次凹西南部,具备较大的勘探潜力。

2.2 储层特征

2.2.1 岩性及含油特征

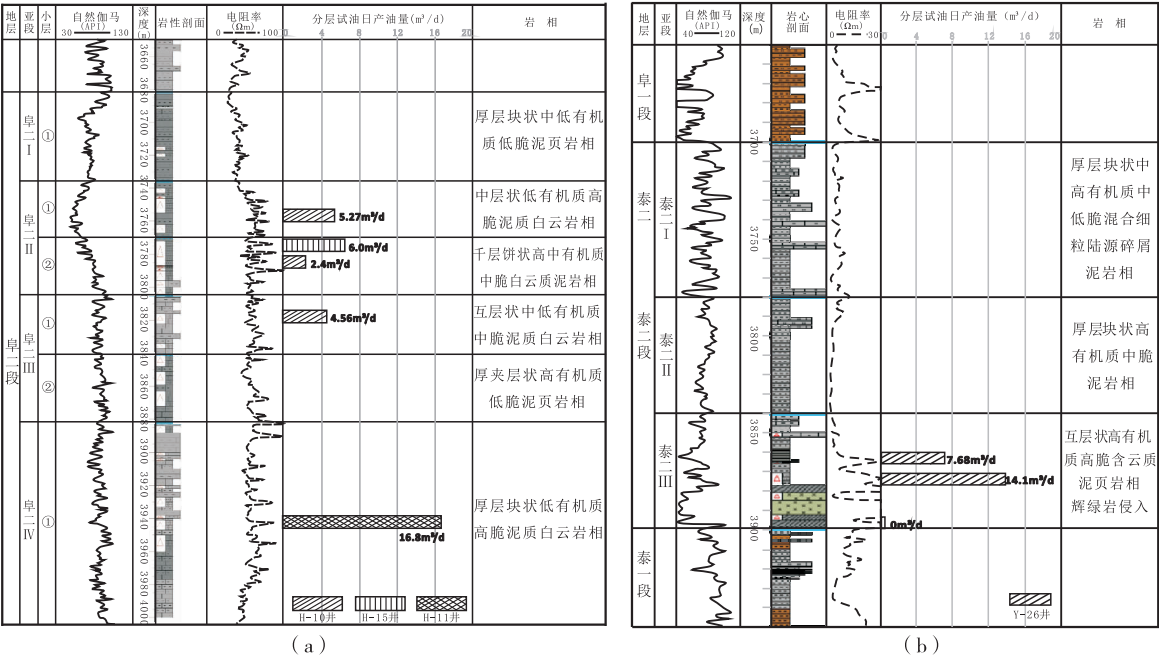
曲塘次凹阜二段沉积时处于半深湖-深湖亚相,形成一套广湖相富含碳酸盐岩的灰黑色泥页岩体系,随着湖扩,湖盆沉积环境由强还原高盐度到还原环境的半咸水湖盆环境,沉积岩性由泥质白云岩相

变为泥页岩相,沉积构造由厚层块状变为互层状、纹层状(傅强等,2007)。

底部的 E_1f^2IV 亚段沉积于强还原环境,发育厚层块状、层状泥质白云岩,夹混合沉积岩,厚度达 100 m,有连续较好的油气显示。H-11 井在该段试油取得单层日产 16.8 m^3 的高产油流;中部的 E_1f^2III 、 E_1f^2II 亚段随着沉积环境的变化,发育千层饼状泥质白云岩和白云质泥岩互层沉积, E_1f^2II 亚段发育一段低 GR、高 RT 的厚层泥质白云岩段,该段厚度 115 m,连续油气显示,局部富集。H-10、H-15 井在该段试油取得单层日产 6 m^3 工业油流。顶部 E_1f^2I 亚段沉积为较深湖亚相,并伴随着少量陆源碎屑,发育厚层块状泥岩和粉砂质泥岩,厚度为 50 m,局部油气显示好;H-14 井在该段取心连续油气显示 14 m(图 5a)。

洋心次凹泰二段发育有完整的湖进、湖退旋回,形成 2 套分异明显的岩性组合:上部 $E_1 t^2 I$ 、 $E_1 t^2 II$ 亚段发育厚层泥岩和页岩组合,混合细粒沉积岩,少量鲕粒灰岩,厚度为 150 m,无油气显示;下部 $E_1 t^2 III$ 发育互层状泥页岩+泥质白云岩+泥质灰岩组合,泥质白云岩主要以中层块状夹持于泥页岩中,厚

50 m,有连续油气显示。Y-26 井在该段试油,获得单层日产油 15 m^3 高产(图 5b);洋心泰二段还发育一段厚 10~18 m 的火山侵入岩,表现出低伽马、低声波时差、低中子孔隙度、高密度、高电阻率的三低两高特征(图 5),对上覆地层影响厚度约为自身厚度的 1~2 倍,是泰二段油气富集的主控因素之一。



a. 曲塘次凹阜二段综合柱状图;b. 洋心次凹泰二段综合柱状图

图 5 ZJ 探区阜二段及泰二段综合柱状图

Fig. 5 Composite bar chart of 2nd member of Funing and Taizou Formation in ZJ exploration area

2.2.2 储层脆性特征

岩石脆性是指其在破裂前未察觉到的塑性变形性质,亦即岩石在外力作用(压裂)下容易破碎的性质。页岩油气的体积压裂设计中,岩石的脆性是必须考虑的重要因素之一,常以脆性指数来刻画岩石的脆性特征。本次利用岩石组分算法对研究区目的层的脆性特征进行分析(刘蕾等,2019)。

在页岩油气评价中,优势岩性包含了石英、长石、白云石、方解石、方沸石,这些矿物称之为广义脆性矿物,对应的广义脆性指数计算公式如下(刘蕾等,2019;范卓颖等,2015)。

$$BI_{广义} = \frac{\text{碎屑颗粒} + \text{钙质} + \text{方沸石}}{\text{碎屑颗粒} + \text{钙质} + \text{方沸石} + \text{黏土杂基}} \times 100\%$$

式中 $BI_{广义}$:广义脆性指数,无量纲;碎屑颗粒:石英与长石的百分含量;钙质:白云石与方解石的百分含量;方沸石:方沸石百分含量;黏土杂基:黏土杂

基的百分含量。

通过对研究区 10 口井进行岩心观察、薄片鉴定、X 衍射等综合分析,认为矿物成分多样,由 8 种矿物成分组成,整体上无明显优势矿物,且黏土矿物含量多小于 30%,脆性矿物含量较高。其中,阜二段脆性指数平均为 73% 左右,泰二段平均为 80% (图 6),证明研究区内页岩储层性脆、可压性高。

2.2.3 储集空间特征

页岩储集层是非常规油气储集层的一种,主要是指物性差,孔隙度主体小于 10%,渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔喉以微孔、纳米孔为主的一类储集层(张志平等,2017;曾维主等,2019)。研究区页岩油藏储集层主要发育基质微孔、次生溶蚀孔及天然微裂缝等,基质孔隙普遍含油,孔缝复合区、溶蚀孔洞区含油富集(图 7)。

基质微孔主要存在于泥页岩内有机质孔和白云

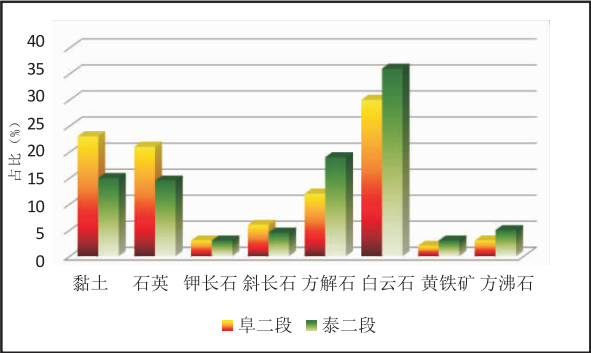


图 6 ZJ 探区阜二段及泰二段岩石矿物组分占比图
Fig. 6 The mineral composition chart of 2st member of Funing and Taizou formation in ZJ exploration area

石的晶间孔, 占据总孔隙的 90%。这类孔隙的孔径一般小于 3 nm, 属纳米孔隙系统, 实测有效孔隙度一般为 0.7%~3.5%, 平均为 2.2%, 泥页岩基质中具备较好的储集空间特性。从荧光薄片观察, 揭示阜二、泰二段基质孔隙普遍含油, 证实了页岩油藏连续分布的特点。

泥页岩储层中含大量碳酸盐矿物, 发育大量的次生溶蚀微孔和顺层溶蚀缝, 溶蚀孔孔隙直径大小一般为 10~100 μm, 一般呈孤立状, 多被有机质沥青充填, 为重要的油气富集空间。洋心次凹 Y-26 井 E₁t²Ⅲ亚段发育大量与火山岩侵入的热液流体有关的溶蚀孔洞和泥岩收缩缝, 录井取心显示较好, 压裂试油获 15 m³/d 的高产油流, 证实为油层富集段。

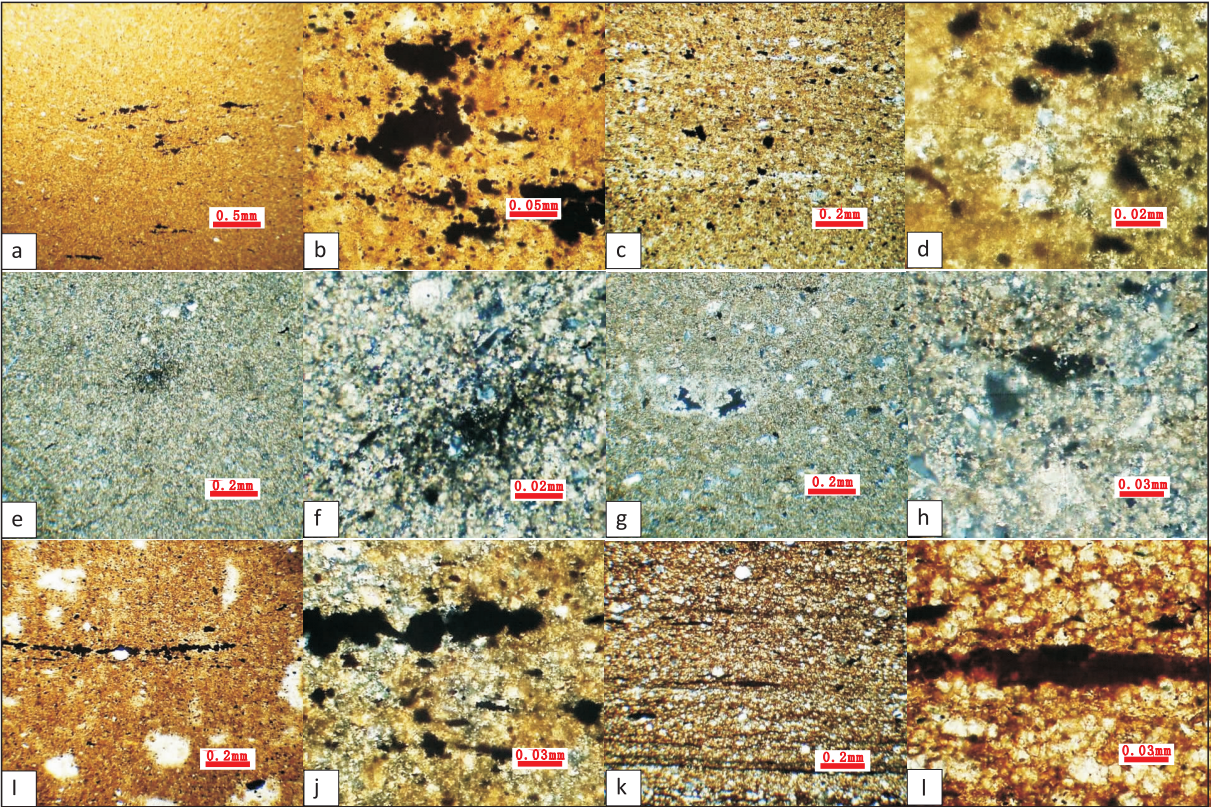


图 7 曲塘 H-10 井阜二段泥页岩孔隙度类型特征图
Fig. 7 The characteristics of porosity type of mud shale in 2nd member of Funing formation of H-10 well in Qutang secondary sag

储层中发育大量以水平层理缝和高角度微裂缝为主的天然裂缝, 水平层理缝在泥岩和云岩互层段较发育, 高角度缝在云质含量较高的层段较发育, 岩心断面有原油渗出, 表明天然裂缝是页岩油良好的储集空间和运移通道。曲塘次凹 H-10 井 E₁f²Ⅱ亚段一段孔缝发育区, 录井取心显示较好, 压裂试油

获高产油流, 证实裂缝发育段油层富集区。

3 页岩油评价成效

2017 年, 针对曲塘阜二段、洋心泰二段 4 口井老井开展试油, 均取得重大突破。曲塘阜二段的

H-10 井、H-11 井、H-15 井在 $E_1 f^2 II \sim E_1 f^2 IV$ 亚段 5 个小层均获得高产油流,最高单层日产 $16.8\text{ m}^3/\text{d}$,累计产油 644 t (表 2)(图 5a)。

洋心泰二段的 Y-26 井在泰二段Ⅲ亚段 2 层获高产油流,最高单层日产 $14\text{ m}^3/\text{d}$,累计产油 570 t (表 2)(图 5b)。并对阜二和泰二段页岩油原油性质进行了分析:密度: $0.85 \sim 0.87\text{ g}/\text{cm}^3$,粘度(80°C): $4 \sim 9\text{ mpa}\cdot\text{s}$,凝固点: $36 \sim 40^\circ\text{C}$,饱和烃+芳

烃: $60\% \sim 75\%$,非烃+沥青质: $15\% \sim 40\%$ 。油品定义为:高凝中高粘中度重质油,泰二段油品略好于阜二段。

从 4 口井的试油结果可以看出,苏北页岩油普遍发育具有高产潜力,层层突破单层最高产能为 $4 \sim 16.8\text{ m}^3/\text{d}$,但井间和层间产能差异大,说明纵向和平面非均质性较强,亟需针对油气富集的甜点区攻关评价。

表 2 ZJ 探区 4 口老井试油情况表
Tab. 2 Theoil test table of 4 old wells in Subei exploration area

试油井号	地层	层号/段号	累产液(m^3)	累产油(m^3)
H-10 试油情况	$E_1 f^2 II \textcircled{1}$	32 #	840	50.24
	$E_1 f^2 II \textcircled{2}$	33 #	575	39.86
	$E_1 f^2 III \textcircled{1}$	34 #	851	56.2
	合层求产		1 016	168
	累计		3 282	315
Y-26 试油情况	$E_1 t^2 III$	第三段	522	168
	$E_1 t^2 III$	第二段	623	262
	$E_1 t^2 III$	第一段	809	0
	第二、三段合采		127	140
	累计		2 081	570
H-11 试油情况	$E_1 f^2 IV \textcircled{1}$	40 #	812	251
H-15 试油情况	$E_1 f^2 II \textcircled{2}$	40 #	415	78

4 地质工程一体化甜点评价方法

4.1 “甜点区”优选与预测方法

通过地质、地震、储层等方面综合评价,优选出地质和工程甜点,作为评价的有利区。地质甜点评价包括地震预测技术和地质多因素多图叠合技术;工程甜点评价重点是储层成分的分析评价技术。通过以上技术系列达到有效识别优质烃源岩、预测储层厚度、裂缝发育区以及储层的可压性评价。最终形成针对研究区的页岩油藏平面“甜点区”地质工程综合评价标准(表 3),并划分 3 类“甜点”类型:Ⅰ类最好,Ⅲ类最差。根据评价标准,利用多因素多图叠合技术,划分研究区页岩油藏类型。

曲塘次凹阜二段页岩油“甜点区”类型主要以Ⅰ类和Ⅱ类为主。Ⅰ类区主要分布于次凹中心及北部

斜坡区,面积约 33.33 km^2 ,该区埋藏适中,生烃条件好,储层厚度适中、脆性指数高,微裂缝发育,该区目前已有 4 口井取得突破;Ⅱ类区主要分布于次凹南部斜坡,该区带埋藏较深(图 8)。

洋心次凹泰二段页岩油“甜点”类型主要以Ⅰ类和Ⅱ类为主。Ⅰ类区呈东北长条状分布在凹陷中心以北区域,面积约 36 km^2 ,埋藏较深 $3\ 800\text{ m}$,生烃条件好,TOC 为 $2\% \sim 3\%$;储层厚度适中,为 $20 \sim 60\text{ m}$;脆性指数高。Ⅱ类区主要分布于次凹北部斜坡。

洋心泰二段甜点区评价除了上述标准外,辉绿岩体的展布也是优质甜点的主控因素之一。通过调研国内外相关文献,发现辉绿岩侵入带内储集条件会得到改善,纵向上对上覆地层影响厚度约为自身厚度的 $1 \sim 2$ 倍(王颖等,2010)。因此,研究辉绿岩侵入带的分布是预测页岩油甜点区的关键因素。

表 3 曲塘次凹阜二段页岩油平面“甜点区”评价标准表

Tab. 3 The evaluation standard of the “dessert area” in the plane of shale oil in the 2nd member of Funing formation of Qutang secondary sag

分类		评价参数	I 类	II 类	III 类
地质评价	烃源岩评价	有机碳含量大于 1% 的烃源岩厚度(m)	>70	50~70	50~70
		镜质体反射率(%)	>0.9	0.7~0.9	0.5~0.7
	储集层评价	主要储层厚度(m)	>22	18~22	16~18
工程评价	可压性评价	脆性指数(%) (脆性矿物含量)	>70	>70	67~70
	裂缝评价	裂缝	微裂缝发育	微裂缝较发育	微裂缝不发育

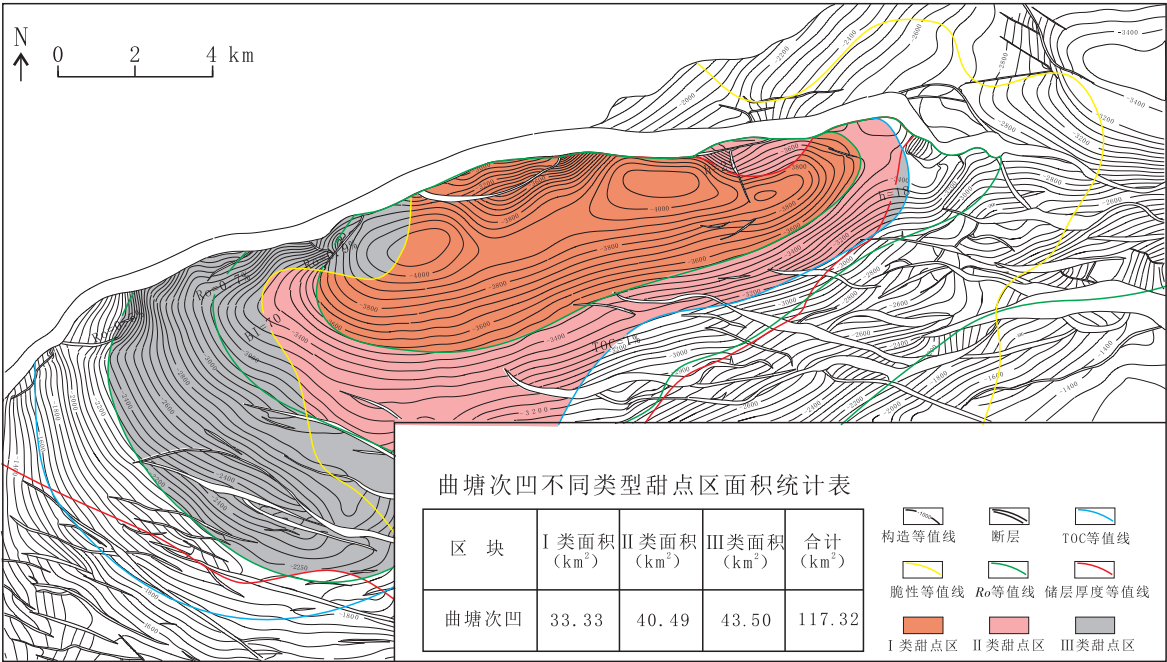


图 8 曲塘次凹阜二段油藏类型评价图

Fig. 8 Evaluation map of reservoir type in the 2nd member of Funing formation of Qutang secondary sag

本次研究从辉绿岩的电性、频谱及反射特征综合分析辉绿岩的特点,发现岩石系列为钙碱性系列,岩石类型为基性岩,长石种类以斜长石为主。电性上表现出低伽马、低声波时差、低中子孔隙度、高密度、高电阻率的三低两高特征,地震反射上表现为低频强振幅的特征。最终发现,在敏感频带下 5~15 Hz 的振幅属性适用于辉绿岩的预测(图 9)。利用此特征预测出洋心次凹辉绿岩纵横发育特征发育,由南往北顺层侵入,面积为 14 km²,平均厚度为 10~18 m,辉绿岩发育区内以 I 类甜点区为主。

利用该方法预测苏北页岩油有利区,先后评价的 4 口井均取得突破,单井突破率 100%,从而验证了该方法在苏北页岩油勘探评价优选靶区的实战意义。

4.2 “七性”关系评价方法

非常规页岩储集层评价不同于常规储集层,除常规的岩性、物性、电性、含油性外,需要开展烃源岩特性、脆性、可压裂性等“七性”,以评价烃源岩和工程甜点,优化压裂施工工艺,提高单井产量。本次研究以测井手段为主,在辅以大量岩心实物化验分析

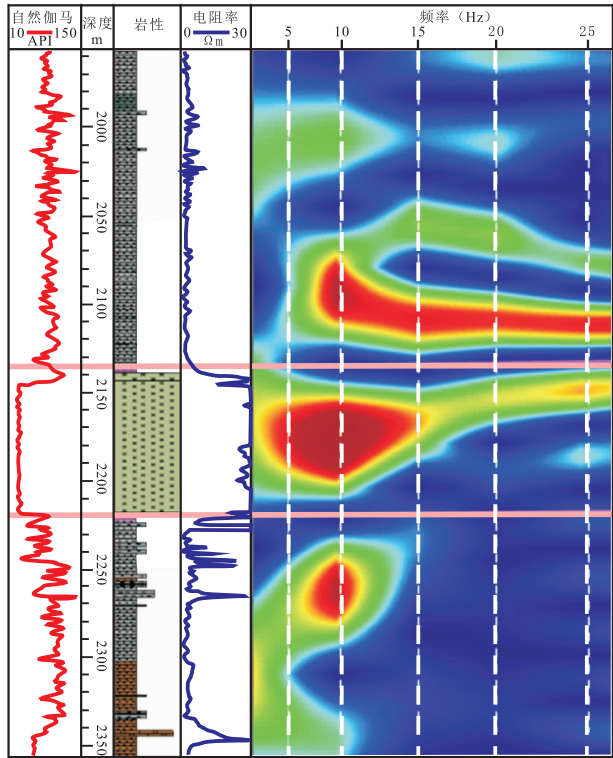


图 9 洋心次凹 Y-27 井辉绿岩电性特征和频谱特征图

Fig. 9 The rock electrical and frequency characteristics of Y-27 well in Qutang secondary sag

数据的基础上,通过单井或综合多井建立反映研究区“七性关系”的铁柱子,形成页岩油藏“七性”评价标准(表 4),以实现源岩品质、储层品质和工程品质评价,为水平井钻井选层、井眼轨迹和压裂造缝设计提供指导。

单井纵向“甜点段”既要满足有优质烃源岩,又要有物性好的储集层,通过建立全区“七性”关系“铁柱子”,阜二段纵向上初步划分 3 个“甜点段”。自下而上分别为:Ⅳ亚段中段、Ⅱ亚段①②、Ⅲ亚段①、Ⅰ亚段中段。烃源岩优质,TOC 值为 1%~4%, R_o 值均大于 0.7%, S_1+S_2 为 $3.5\times 10^{-3}\sim 7\times 10^{-3}$,含油性好,电阻率为 $20\ \Omega\cdot m$ 左右,气测显示异常,储层物性较好,孔隙度均大于 2%,脆性平均大于 65%,为好-中等油层;泰二段底部Ⅲ亚段发育 1 个“甜点段”,TOC 值为 2%~4%, R_o 值为 0.6%~1.2%,脆性为 82%左右,综合评价为好-中等油层。

从对研究区 H-10 井、H-11 井、H-15 井、Y-26 井 4 口老井试油结果看,分别在 E_1f^2 Ⅳ亚段 E_1f^2 Ⅱ、 E_1f^2 Ⅲ亚段和 E_1t^2 Ⅲ亚段甜点位置试油获高产油流,评价井单层突破率达 87.5%,验证了“七性”关系评价方法在 ZJ 探区页岩油纵向选层的重大应用价值。

表 4 ZJ 探区页岩油“七性”综合评价表

Tab. 4 The comprehensive evaluation table of “seven characteristics” of shale oil in Subei exploration area

层位	类型	岩性	含油性		物性		电性				烃源岩特性		脆性	地应力特性	
			So(%)	气测全烃(%)	孔隙度(%)	渗透率(md)	GR(API)	RT($\Omega\cdot m$)	DEN(g/cm^3)	AC(us/m)	TOC(%)	S_1+S_2 (%)	脆性指数(%)	σ_{max} (Mpa)	σ_{min} (Mpa)
阜二段	好油层	泥质云岩、云质泥岩	≥ 50	≥ 6	≥ 2	$\geq 0.002\ 4$	45~90	≥ 8.0	2.4~2.6	215~265	≥ 2	≥ 5	≥ 50	100~125	65~95
	中等油层	泥质云岩、云质泥岩	40~50	2~6	≥ 2	$\geq 0.002\ 4$	45~90	≥ 6.0	2.4~2.6	215~265	≥ 1.8	≥ 5	≥ 40	100~125	65~95
	差油层	泥质白云岩、云质泥岩	30~40	1~2	≥ 1.5	$\geq 0.000\ 25$	45~90	≥ 4.0	2.4~2.6	215~265	1.2~1.8	≥ 5	≥ 40	100~125	65~95
泰二段	好油层	泥质白云岩、云质泥岩	≥ 50	≥ 40	≥ 3.5	$\geq 0.004\ 1$	40~75	≥ 8.0	2.4~2.7	200~265	≥ 3	≥ 10	≥ 45	90~135	55~82
	中等油层	泥质白云岩、云质泥岩	35~50	10~40	≥ 3.5	$\geq 0.004\ 1$	60~80	4.5~8.0	2.4~2.7	200~265	≥ 3	≥ 10	≥ 45	90~135	55~82

5 结论

(1) 研究区阜二段、泰二段发育 2 套源储一体式页岩油藏, 烃源岩具有质优、量大的特征, 优质烃源岩厚度在 30~100 m, 面积约 70 km², 初核总资源超 10¹² t, 资源潜力丰富。

(2) 曲塘阜二段发育互层状中等有机质中高脆云质泥页岩相, 泰二段发育厚层块状泥岩和互层云质泥页岩相, 储集空间以基质微孔、次生溶蚀孔及天然微裂缝为主。泰二段底部发育侵入火山岩, 对储层改造作用明显, 综合电性、岩性和频谱特征, 识别出研究区发育 14 km² 厚 10~18 m 的辉绿岩体。

(3) 4 口井 8 个层的压裂试油揭示 ZJ 探区页岩油藏大面积富集且具有高产潜力, 单层最高产能为 4~16.8 m³/d, 单平面和纵向产能差异大, 表现出较强的非均质性。

(4) 初步形成 2 套页岩油地质工程一体化勘探评价方法: “甜点区”优选与预测方法从地质和工程角度评价区域上的有利靶区, “七性”关系评价方法综合评价储层 7 种性质, 精准靶点, 为水平井钻井选层、导向和压裂设计提供指导。

参考文献(References):

- 陈安定. 苏北盆地构造特征及箕状断陷形成机理[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(02): 140-150.
- CHEN Anding. Tectonic features of the Subei Basin and the forming mechanism of its dustpan-shaped fault depression[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(02): 140-150.
- 傅强, 李益, 张国栋, 等. 苏北盆地晚白垩世—古新世海侵湖泊的证据及其地质意义[J]. 沉积学报, 2007, (03): 380-385.
- FU Qiang, LI Yi, ZHANG Guodong, et al. Evidence of Transgression Lake of Subei Basin During Late Cretaceous and Paleocene Epoch and Its Geological Significance[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, (03): 380-385.
- 邱旭明, 钱诗友, 于雯泉, 等. 苏北盆地“十二五”油气勘探主要成果、新认识和技术进展[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(03): 62-73.
- QIU Xuming, QIAN Shiyu, YU Wenquan, et al. Main achievements, new understanding and technological progress for oil and gas exploration in North Jiangsu Basin during the 12th Five-Year Plan[J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(03): 62-73.
- 罗怀忠, 梁兴, 张介辉, 等. 苏北盆地泰州低凸起油气勘探前景及选区评价[J]. 天然气工业, 2011, 31(10): 42-46+117-118.
- LUO Huaizhong, LIANG Xing, ZHANG Jiehui, et al. Exploration potential and favorable play identification in the Taizhou low salient of the Subei Basin[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(10): 42-46+117-118.
- 管保山, 刘玉婷, 梁利, 等. 页岩油储层改造和高效开发技术[J]. 石油钻采工艺, 2019, 41(02): 212-223.
- GUAN Baoshan, LIU Yuting, LIANG Li, et al. Shale Oil Reservoir Reconstruction and efficient development technology[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2019, 41(02): 212-223.
- 薛永超, 田斌丰. 鄂尔多斯盆地长 7 致密油藏特征[J]. 特种油气藏, 2014, 21(03): 111-115+156.
- XUE Yongchao, TIAN Xiaofeng. Characteristics of Chang 7 tight oil reservoir, Ordos basin[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2014, 21(03): 111-115+156.
- 魏建设, 王宝文, 乔世海, 等. 内蒙古西部额济纳旗希热哈达地区二叠系页岩油(气)地质条件初探[J]. 西北地质, 2018, 51(3): 200-213.
- WEI Jianshe, WANG Baowen, QIAO Shihai, et al. A Preliminary Study on the Geological Conditions of the Permian Shale Oil(Gas) in Xirehada Area, Western Inner Mongolia[J]. Northwestern Geology, 2018, 51(3): 200-213.
- 贾培锋, 杨正明, 肖前华, 等. 致密油藏储层综合评价新方法[J]. 特种油气藏, 2015, 22(04): 33-36+152.
- JIA Peifeng, YANG Zhengming, XIAO Qianhua, et al. A New Method to Evaluate Tight Oil Reservoirs[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2015, 22(04): 33-36+152.
- 张水昌, 梁狄刚, 张大江. 关于古生界烃源岩有机质丰度的评价标准[J]. 石油勘探与开发, 2002, (02): 8-12.
- ZHANG Shuichang, LIANG Digang, ZHANG Dajiang. Evaluation criteria for Paleozoic effective hydrocarbon source rocks[J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, (02): 8-12.
- 倪春华, 周小进, 王果寿, 等. 海相烃源岩有机质丰度的影响因素[J]. 海相油气地质, 2009, 14(02): 20-23.
- Ni Chunhua, ZHOU Xiaojin, WANG Guoshou, et al. Factors Affecting Organic Matter Abundance of Marine Source Rocks[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2009, 14(02): 20-23.
- 黄第藩. 在华北地台下奥陶统地层中发现低成熟的碳酸盐

- 岩烃源岩[J]. 石油勘探与开发, 1992, (04): 108.
- HUANG Difan. Low mature carbonate source rocks are found in the ordovician strata under the north China platform [J]. Petroleum Exploration and Development, 1992, (04): 108.
- 曾花森, 蔡郁文, 霍秋立, 等. 烃源岩中有效有机质的类型评价及意义[J]. 大庆石油地质与开发, 2013, 32 (03): 8-14.
- ZENG Huasen, CAI Yuwen, HUO Qiuli, et al. Evaluation of the Effective Organic Matter Types in Hydrocarbon Source Rock and its Implication[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2013, 32 (03): 8-14.
- 涂建琪, 王淑芝, 费轩冬. 干酪根有机质类型划分的若干问题的探讨[J]. 石油实验地质, 1998, (02): 187-191+186.
- TU Jianqi, WANG Shuzhi, FEI Xuandong. Disussion on Certain Problems to the Division of Organic Matter Types in Kerogen[J]. Experimental Petroleum Geology, 1998 (02): 187-191+186.
- 李春鹏, 隋桂梅, 刘志国, 等. 成熟—过成熟烃源岩有机质类型识别[J]. 物探与化探, 2017, 41(02): 219-223.
- LI Chunpeng, SUI Guimei, LIU Zhiguo, et al. Organic Type Identification for Mature and Postmature Source Rock [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2017, 41 (02): 219-223.
- 李艳红, 金奎励. 烃源岩成熟度评价指标及选取[J]. 地质地球化学, 2000, (02): 94-96.
- LI Yanhong, JIN Kuili. Evaluation Indices for Maturity of Hydrocarbon-source Rocks[J]. Geology-Geochemistry, 2000, (02): 94-96.
- 单俊峰, 王佳林, 韩霞. 辽河坳陷雷家致密油烃源岩评价标准探讨[J]. 特种油气藏, 2017, 24(01): 22-26.
- SHAN Junfeng, WANG Jialin, HAN Xia. Discussion of Leijia Source-Rock Evaluation Criteria in Liaohe Depression [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2017, 24 (01): 22-26.
- 李登华, 李建忠, 张斌, 等. 四川盆地侏罗系致密油形成条件、资源潜力与甜点区预测[J]. 石油学报, 2017, 38 (07): 740-752.
- LI Denghua, LI Jianzhong, ZHANG Bin, et al. Formation Condition, Resource Potential and Sweet-Spot Area Prediction of Jurassic Tight Oil in Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(07): 740-752.
- 郭秋麟, 武娜, 陈宁生, 等. 鄂尔多斯盆地延长组第7油层组致密油资源评价[J]. 石油学报, 2017, 38(06): 658-665.
- GUO Qiulin, WU Na, CHEN Ningsheng, et al. An Assessment of Tight Oil Resource in 7th Oil Reservoirs of Yan-chang Formation, Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(06): 658-665.
- 朱德顺. 陆相湖盆页岩油富集影响因素及综合评价方法——以东营凹陷和沾化凹陷为例[J]. 新疆石油地质, 2019, 40(03): 269-275.
- ZHU Deshun. Influencing Factor Analysis and Comprehensive Evaluation Method of Lacustrine Shale Oil: Cases from Dongying and Zhanhua Sags[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40(03): 269-275.
- 刘蕾, 宋骥衍. 苏北盆地高邮凹陷阜四段泥页岩储层可压裂性评价[J]. 中国锰业, 2019, 37(03): 45-48.
- LIU Lei, SONG Yuyan. Fractureability Evaluation of Shale Reservoirs in the Fourth Member of the Fourth Member of Gaoyou Sag, Subei Basin[J]. China's Mangnese Industry, 2019, 37(03): 45-48.
- 范卓颖, 林承焰, 王天祥, 等. 致密地层岩石脆性指数的测井优化建模[J]. 石油学报, 2015, 36(11): 1411-1420.
- FAN Zhouying, LIN Chengyan, WANG Tianxiang, et al. Logging Optimization Modeling on Brittleness Index of Tight Formation Rocks [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(11): 1411-1420.
- 张志平, 方光建, 曾春林, 等. 渝东北下寒武统页岩气储层特征研究[J]. 西北地质, 2017, 50(4): 209-214.
- ZHANG Zhiping, FANG Guangjian, ZENG Chunlin, et al. The Research on Reservoir Characteristics of Lower Cambrian Shale Gas in Northeast Chongqing[J]. North-western Geology, 2017, 50(4): 209-214.
- 曾维主, 周国议, 宋之光. 松辽盆地青山口组页岩孔隙结构及其对页岩油富集的影响[J]. 地球化学, 2019, 48 (06): 632-643.
- ZENG Weizhu, ZHOU Guoyi, SONG Zhiguang. Influence of Pore Structure on the Shale Oil Accumulation of the Qongshankou Formation in the Songliao Basin [J]. Geochimica, 2019, 48(06): 632-643.
- 王颖, 谢东霖, 薛成刚. 辉绿岩侵入作用对油气储层的影响——以高邮凹陷北斜坡中东部地区阜三段为例[J]. 石油天然气学报, 2010, 32(02): 174-177.
- WANG Ying, XIE Dongling, XUE Chengang. The Influence of Diabase Intrusion on Oil and Gas Reservoir [J]. Journal of Oil and Gas Technology (J JPI), 2010, 32 (02): 174-177.